

◀“863”计划专栏▶

随钻地震波场传播与数据处理方法的数值实验

王 鹏 葛洪魁 陆 斌 杨 微

(中国地震局 地球物理研究所,北京 100081)

摘要:随钻地震(SWD)是利用钻头旋转破岩振动产生的地震波来实现钻前预测的一项新技术。因钻头振动能量弱、井场噪音能量强以及随机连续振动造成的不同时刻、不同震相的波相互叠加,使随钻地震信噪比很低,波场非常复杂,数据处理难度大。而现场试验周期长,费用高,地下结构等未知因素多,不利于开展 SWD 研究。数值模拟具有在控制条件下开展研究的优势,是一种高效、廉价的数值实验方法。在 Seismod 地震波场模拟软件和 Matlab 信号分析软件的基础上,针对随钻地震低信噪比、震源信号连续随机的特点,以黏弹性介质地震波动方程、交错网格高阶有限差分数值解法和互相关信号分析为核心,建立了 SWD 数值实验平台,算例结果证明该模拟平台是可靠的。同时利用该模拟平台对 SWD 波场传播、直达波与反射波时距曲线特征、数据处理方法等进行了数值实验,深化了对 SWD 波场传播规律和 SWD 数据处理方法的认识。

关键词:随钻地震;数值模拟;波场;数据处理;时距曲线

中图分类号:TE21; TE271 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2009)02-0005-05

随钻地震(seismic while drilling, SWD)是20世纪90年代初发展起来的新技术,利用钻头破岩振动产生的地震波,实时预测钻头前方地层的异常高压等,以减小钻探风险^[1]。国外对随钻地震技术的研究较早,已开发出了一些产品,并已具有商业服务能力^[2]。国内对该技术的研究较晚,到目前为止仍处于研究开发阶段。一些科研单位和高校联合开发了一些产品,进行了现场试验,取得了现场数据和一些成果^[3]。由于钻头振动能量弱、井场噪音能量强以及随机连续振动造成的不同时刻、不同震相的波相互叠加,使 SWD 信噪比很低,波场非常复杂,数据处理难度大,成为 SWD 技术发展的制约因素。现场试验周期长,费用高,地下结构等未知因素多,不利于开展地震波场传播规律和数据处理方法研究。而数值模拟具有在控制条件下开展研究的优势,是一种高效、廉价的数值实验方法,所以可以利用随钻地震的波场模拟,近似模拟现场试验中的地层结构和井场情况,来研究波场的传播规律和特征。

地震波场数值模拟技术在国内外的发展已经相当成熟了,但随钻地震中的波场模拟还很少。J. Carcione 等^[4]首先开展了 SWD 数值模拟研究,主要研究三维均匀弹性介质中 SWD 地震波场的传播规律,模拟结果与实际处理结果基本相符,但模拟中以雷克子波为震源,与实际钻头破岩产生的连续随机信号有较大的差异,并且没有考虑噪声。杨微

等^[3]依然以雷克子波为震源对二维均匀弹性介质进行了 SWD 波场模拟,但引进了三分量信号的接收和偏振分析处理,基本能识别出直达波和反射波波场的传播特征。J. Carcione 和杨微的主要工作均集中于波场传播规律模拟,对于制约 SWD 技术发展的瓶颈问题——数据处理方法没有涉及。因此需要针对随钻地震的波场传播和数据处理方法开展数值实验,在研究波场传播规律的基础上进一步验证数据处理方法的正确性和可行性,初步建立一个随钻地震的数值试验平台,并在应用中不断完善,为随钻地震技术研究提供一种高效的研究手段。

1 SWD 数值实验平台的建立

地震数值模拟就是在假定地下介质结构模型和相应物理参数已知的情况下,模拟研究地震波在地下各种介质中的传播规律,并计算在地面或地下各观测点所应观测到的数值地震记录的一种地震模拟

收稿日期:2008-08-26; **改回日期:**2008-11-27

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“随钻地震信号处理技术”(编号:2006AA06A108)部分研究内容

作者简介:王鹏(1983—),男,2006 年毕业于中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,在读硕士研究生。

联系电话:(010)89733935

方法。可以利用地震波场数值模拟开展随钻地震波场特征和数据处理方法研究,来指导随钻地震数据采集与波场分离、去噪和有效信号提取。

1.1 SWD 数值实验平台的技术要求

SWD 与普通地面地震观测方式和数据处理方法有很大的不同。SWD 通常用钻柱顶端记录的振动信号(参考信号)与地面测线上记录到的信号作互相关处理,以获取从地层中传播的直达波和反射波的信息,实现钻前预测。

钻头破岩产生的振动为连续随机脉冲,因此 SWD 数值模拟中需要采用更加真实的连续随机振动震源信号,而以往的研究都是采用雷克子波作为震源函数。由于震源类型不同使 SWD 的数据处理方法与脉冲震源有很大的不同,随钻地震数据处理以互相关为核心,由于波场的复杂性,将用到多种信号分析方法,如反褶积、叠加、滤波和偏振分析等,因此 SWD 数值实验平台需要具备多种信号分析能力。由于井场周围各种机械设备和地面测线处地表等噪音的干扰,造成接收到的信号信噪比很低,有效信号提取难度大,所以要根据随钻地震的实际情况,在模拟系统中加入各种噪声。总之,SWD 数值实验平台是为 SWD 波场的传播规律和 SWD 数据处理方法研究服务的,需要针对 SWD 野外观测工作方式和数据处理特点,使其满足以下技术要求:

- 1) 模拟 SWD 复杂的波场传播;
- 2) 模拟连续随机的钻头震源信号;
- 3) 利用钻柱顶端的参考信号记录恢复震源信号;
- 4) 加入多种类型强噪音;
- 5) 提供多种信号分析方法;
- 6) 较为符合实际的介质模型;
- 7) 精确高效的数值解法。

1.2 SWD 数值实验平台的建立和实验步骤

到目前为止,还没有专门用于模拟 SWD 的商业软件,经过分析,笔者以 Seismod 地震波场正演模拟软件和 Matlab 信号分析软件为基础建立了 SWD 数值实验平台,其目的是要充分发挥 Seismod 的模拟功能和 Matlab 软件的信号分析功能。

1.2.1 Seismod 地震波场正演模拟软件

Seismod 软件基本具备了模拟 SWD 波场所需的基本功能,分为工区管理、地质建模及参数设计和

地震波场正演模拟。该软件依据波动方程的原理,主要采用了交错网格高阶差分和伪谱地震波模拟算法,可用来研究地球介质中地震波传播的运动学、动力学等特征,模拟多种介质(多孔、弹性、黏弹性、裂隙和各向异性)中的地震波,具有方便灵活的采集观测系统(多次覆盖、VSP 以及井间)和震源参数设计,实时显示模拟波场的传播。

笔者选择了黏弹性介质模型、交错网格高阶有限差分数值解法和完全匹配层(PML)^[5] 边界处理方法。黏弹性介质模型可以较好地模拟地震波在地层中的传播和衰减。交错网格高阶有限差分法在占内存大小、模拟精度、计算效率和并行算法实现方面是实用性最好的方法。采用完全匹配层(PML)方法,可以尽可能地减少人为边界反射。

1.2.2 Matlab 信号分析软件

Matlab 信号分析软件集数值分析、信号处理、仿真控制和图形显示等于一体,构成了一个操作方便、功能强大、界面友好的用户环境和系统开发平台,在信号分析等众多领域有着广泛的应用,特别是专门为地震数据处理开发的 Seislab 工具包具有更多的适合地震信号的处理方法。Matlab 处理软件可以对 Seismod 软件的模拟结果作一些相关的处理(包括叠加、互相关和反褶积等),检验和发展 SWD 数据处理方法。

1.2.3 SWD 数值实验步骤

钻头震源信号恢复 对于 SWD 这类连续随机震源,利用震源信号与地面记录互相关来提取有效信号是基础,震源函数的精确获取是关键。而在实际现场试验中,震源信号是通过钻柱顶端传感器测量的振动信号间接获取的,因此,需要用 Matlab 软件对现场试验中获得的参考信号作反褶积处理恢复钻头震源信号,再截取一段作为所研究的仿真震源。

SWD 波场模拟 利用 Seismod 波场模拟软件进行 SWD 波场数值模拟,包括地层模型的构建、震源的激发和地面信号的接收。

SWD 数据处理方法实验 首先利用 Matlab 软件对模拟得到的地面记录加入随机噪声,然后再对信号作一系列的处理(包括反褶积、互相关和叠加等),最终得到所需要的信号的波场特征,分析走时曲线特征。

1.3 SWD 数值实验平台的算例验证

笔者利用一维水平层状地质模型^[6],分别以雷

克子波和连续随机信号为震源进行波场模拟,将获得的直达波与反射波走时曲线与理论走时曲线进行对比,验证 SWD 数值实验平台的可靠性。表 1 为一维水平层状地质模型参数。

表 1 一维水平层状地质模型参数

地层	深度/m	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	P 波速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	P 波品质因子 Q_p
1	1 500	2 500	2 000	200
2	3 000	3 000	3 000	250
3	4 000	3 500	5 000	300

Q_p 反映地震波在介质中的衰减情况, Q_p 值越大衰减越小; 反之, Q_p 越小衰减越大。 Q_p 的选取以鲁西地区的经验值^[7]为参考。钻头深度为 2 000 m。地震接收道偏移距为 500 m, 道间距为 100 m, 共 30 道。笔者在数值模拟的地面记录中加入信噪比为 0.8 的噪声, 用来模拟地面噪声对记录造成的影响。图 1、2 分别是以雷克子波和连续随机信号为震源的数值模拟结果与理论走时曲线的对比, 图中直达波和反射波的同相轴走向为模拟时距曲线, 理论走时曲线是根据直达波和反射波传播的理论公式求得的。从图 1、2 可以看出, 直达波和反射波的同相轴基本与理论曲线重合, 说明笔者采用的模拟算法和数据处理方法是可靠的。反射波最后几道的小偏差, 是因为理论走时曲线按弹性介质计算的, 与数值模拟采用的介质特性不同造成的。

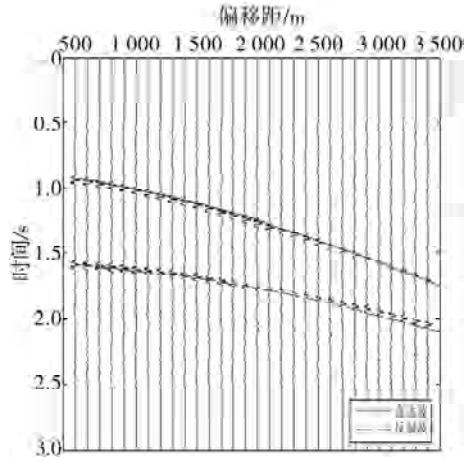


图 1 雷克子波为震源的数值模拟结果与理论走时曲线的对比

2 SWD 数值实验

2.1 随钻地震波场特征

图 3 为垂直方向的波场快照图。从图 3 可以看出, 两个反射界面很明显, 直达波、反射波波前面非常清晰, 波在边界处完全吸收, 不存在边界反射情

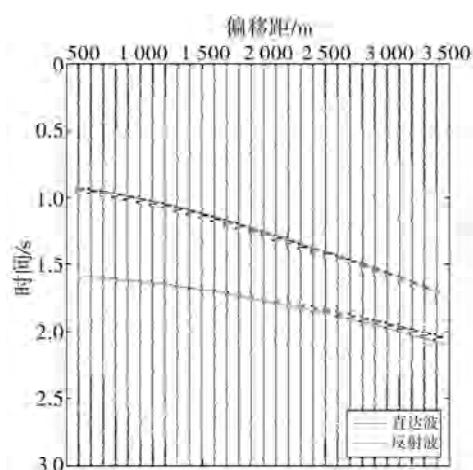


图 2 连续随机信号为震源的数值模拟结果与理论走时曲线的对比

况, 在波场传播中存在多次反射波, 波场复杂, 各种类型的波相互干扰, 相互叠加。

2.2 偏移距的影响

在 SWD 数据采集中, 偏移距对采集效果影响很大, 掌握偏移距对地震记录的影响有助于优化观测系统。图 4 是以雷克子波为震源, 波场经过黏弹性介质传播, 地面采集站的接收记录。从图 4 看直达波的同相轴很清楚, 直达波的振幅很大, 而反射波的振幅相对较小, 但依然能看到反射波的同相轴, 相对反射波而言直达波能量较大。同时, 随着偏移距的增大直达波振幅逐渐减小, 而反射波振幅逐渐加大, 最后几道反射波能量比直达波大。

图 5 为偏移距为 500 和 2 000 m 时随钻地震波场的时深特征曲线, 每道数据考虑了地表噪声的影响, 又经过叠加处理来压制随机噪声。从图 5 可以看出, 反射波在偏移距为 500 m 时震相较弱, 随偏移距增大(2 000 m), 同相轴更加明显, 说明大偏移距有利于获得高信噪比的有效信号, SWD 观测偏移距应适当加大。从图 5 还可以看到, 反射波时间随深度的增加而减小, 但始终大于直达波的时间, 而且随着深度逼近 3 000 m, 直达波和反射波趋于重合, 说明了钻头离反射地层越近, 直达波和反射波就趋于重合而不易辨认。

2.3 F158 井 SWD 数据模拟

2007 年 10 月在 F158 井进行了 SWD 试验, 根据该井声波测井资料和钻井地质设计建立了水平层状 7 层介质模型。钻头深度为 3 080 m。地震接收道偏移距为 500 m, 道间距为 100 m, 共 30 道。将实

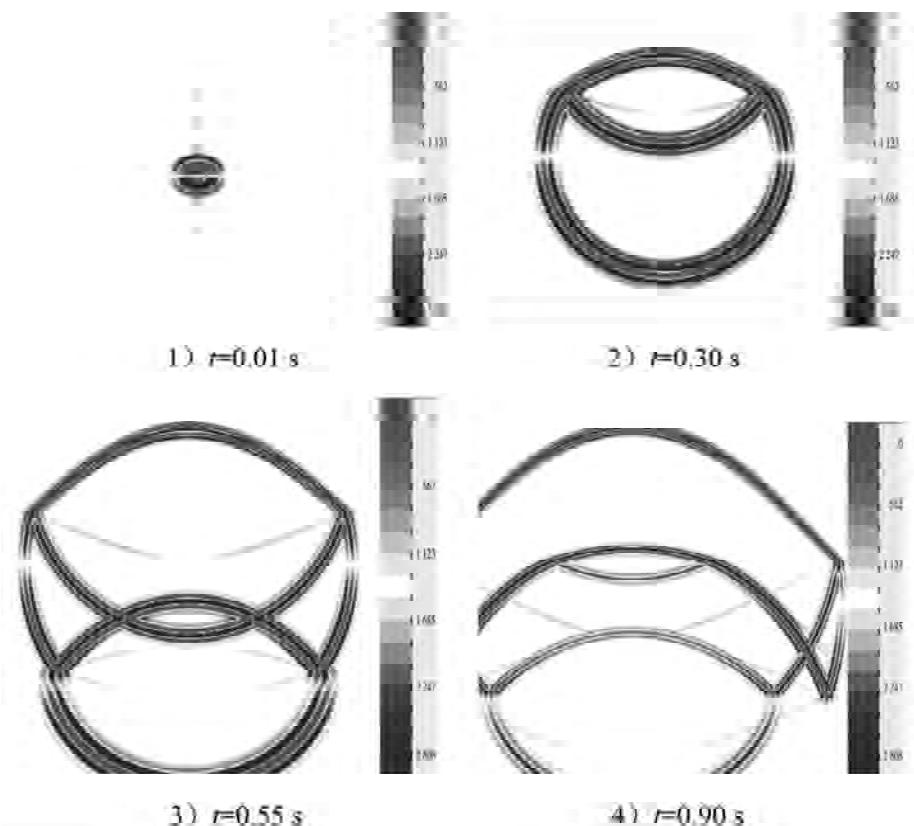


图 3 垂直向的波场快照

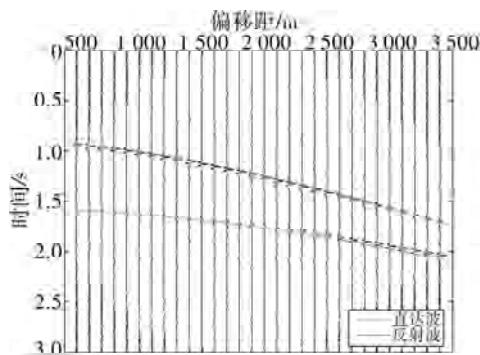


图 4 以雷克子波为震源时地面接收记录

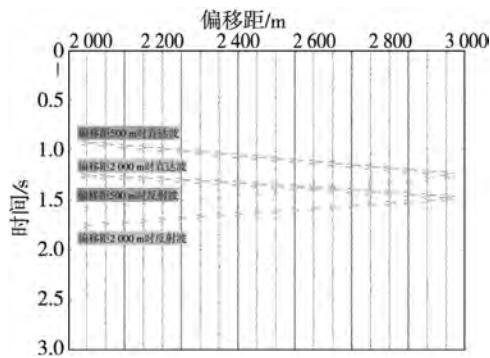


图 5 不同偏移距时的时深关系曲线

际试验中井架顶部接收到的参考信号, 经过反褶积恢复为钻头震源信号, 并与地面模拟记录的各道信号作互相关处理, 得到了井深 3 080 m 处的单炮记

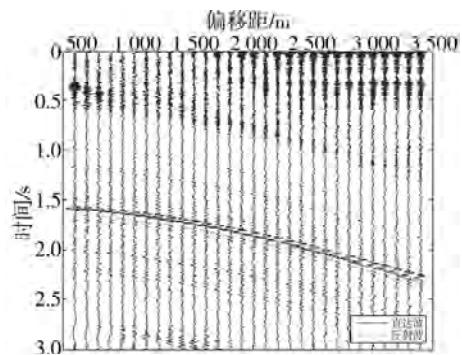


图 6 红色实线和蓝绿色间隔线分别代表直达波与反射波理论曲线

图 6 F158 井井深 3 080 m 处的单炮模拟记录, 见图 6。

从图 6 可以看出, 同相轴很明显, 但直达波和反射波离得很近, 这是由于钻头离前方地层界面只有 60 m, 以至于直达波和反射波几乎重叠在一起, 识别难度加大。在距离反射界面较大距离的井深处提前进行 SWD 观测有利于识别反射信号。这一模拟结果对于 F158 井 SWD 数据处理具有指导意义。

3 结论与建议

1) 随钻地震波场复杂, 信噪比低, 数据处理难度大, 而现场试验周期长, 费用高, 观测条件难以控制,

SWD数值实验可用于随钻地震波场传播规律和数据处理方法研究,是随钻地震研究的有力工具。

2)在Seismod地震波场模拟软件和Matlab信号分析软件的基础上,针对随钻地震低信噪比、连续随机震源信号的特点,建立了SWD数值实验平台,并采用算例验证了该模拟平台的可靠性。

3)随着偏移距的增大直达波振幅逐渐减小,而反射波振幅逐渐加大,大偏移距有利于获得高信噪比的反射信号,SWD观测偏移距应适当加大。在距离反射界面较大距离的井深处提前进行SWD观测有利于识别反射信号。

4)通过反褶积和互相关处理,获得了F158井3 080 m处的单炮模拟记录,对于F158井SWD数据处理具有指导意义。

5)该SWD数值实验平台还需在应用中进一步完善。

参 考 文 献

- [1] 鲍洪志.应用随钻地震技术认识钻井地层环境因素[J].石油钻探技术,2001,29(2):32-33.
- [2] Anchliya A. A review of seismic-while-drilling (SWD) techniques: a journey from 1986—2005[R]. SPE 100352, 2006.
- [3] 杨微.随钻地震检测方法研究[D].北京:中国地震局地球物理所,2006.
- [4] Carcione J, Petronio L, Poletto F, et al. A 3D elastic modelling code for seismic wave propagation and 3D SWD surveys [R]. Italy: science and supercomputing at CINECA, 2001.
- [5] 李景叶,陈小宏.TI介质地震波场数值模拟边界条件处理[J].西安石油大学学报,2006,21(4):20-23.
- [6] 季玉新,韩文功,沈财余,等.胜利油田典型地质模型的地震正演[J].石油地球物理勘探,2006,41(5):12-19.
- [7] 郭爱香,林怀存,姜久坤,等.鲁西地区的Q值分布[J].四川地震,1988(2):5-8.

[审稿 樊洪海]

Numerical Simulation on SWD Seismic Wave Propagation and Data Processing

Wang Peng Ge Hongkui Lu Bin Yang Wei

(Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, Beijing, 100081, China)

Abstract: Seismic While Drilling (SWD) is a new technology to predict the formation by analysing acoustic waves that are emitted from drill-bit. Due to the low energy of drill-bit vibration and the high energy of rig noise along with the superposition of different time and different wave, the SWD signal to noise ratio (S/N) is very low which makes the wave-field complex and difficult for processing. It is difficult to conduct SWD research due to the long experiment time, high expense and unknown underground geological structure. While numerical simulation is a high-efficiency and low-expense numerical experiment technique. Based on seismic wave-field simulation software Seismod and signal processing software using Matlab, a SWD simulation platform was created based on seismic elastic wave equations, the staggered grid high-level finite-difference numerical solution, and the signal processing method of the cross-correlation signal. The simulation results indicate that this numerical simulation platform is reliable. Using this platform, SWD wave-field propagation, the time-distance curve characteristics of direct wave and reflect wave, and data processing method were simulated which can help us understand the SWD propagation and data processing.

Key words: seismic while drilling; numerical simulation; wave field; data processing; hodograph

SPE 111346, 2008

Prediction of Influx Rate and Volume for Planning UBD Horizontal Wells to Reduce Formation Damage

预测水平井欠平衡钻进时地层流体的流入速度和体积以降低地层伤害

欠平衡钻井过程中由于井眼压力始终低于地层孔隙压力,可明显降低钻井作业对地层的伤害。欠平衡钻井作业需要额外的地面设备,如分离器和处理储存油藏流体的储罐。而选择欠平衡分离器和储罐的依据是地层流体的流入速度和总体积,但在现有文献中还没有预测油藏流体的流入速度和总体积的方法。为此,首先将地层流体的流出动态和井眼水力学耦合推导出一个井眼内压力分布方程,然后求出井眼内流体流入速度分布的简单函数,该函数是水平井眼长度的函数,且随时间变化而变化。根据在总深度预测的流体流入速度就可确定分离器的级数。对流入速度在整个水平钻井期间进行积分就可预测出总流入体积,从而确定储罐的容积。将预测流体流入速度和流入总体积的方法编制成了计算程序,并通过一个实例演示了该程序的使用方法。

[闫循彪 译]